

Г. В. АЛЬФИМОВ, В. Ю. ЗАХАРОВ, Ю. А. РУНДЫГИН,  
О. О. САРБУЧЕВА

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ТОПЛИВА И ЗОЛЫ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

G. V. ALFIMOV, V. Ju. ZAKHAROV, Ju. A. RUNDYGIN,  
O. O. SARBUTCHEVA

## MATHEMATICAL MODELLING OF THE MOTION OF FUEL AND ASH PARTICLES IN A THREE-DIMENSIONAL SPACE OF THE FURNACE

При разработке топочных устройств, газификаторов, топливных эжекторов и других агрегатов котельной техники возникает вопрос о движении частиц топлива и золы. Знать траектории, время и скорость движения частиц необходимо для расчетов скорости химического реагирования материала частицы, скорости прогрева и температуры частиц, мест попадания частиц в ограждающие поверхности и т. д. Для решения указанных задач можно использовать математическое моделирование, которое позволяет при небольших затратах получать большое количество вариантов инженерных решений в ходе разработки технологий оптимального воздействия на органическую и минеральную части топлива.

Задачи моделирования особенно актуальны при разработке технологий энергетического использования прибалтийских горючих сланцев — топлива со сложной минеральной частью, поскольку многочисленные промышленные эксперименты в экологически неблагоприятном районе нельзя проводить бесконечно. Настало время оперативно разработать такие технологии сжигания сланцев, которые позволяли бы, с одной стороны, обеспечивать высокую надежность и эффективность сжигания, а с другой — максимально использовать золу и шлак в народном хозяйстве при минимальном отрицательном влиянии технологий сжигания на экологическую обстановку.

До последнего времени в практике моделирования обычно использовали расчетные схемы, описывающие плоскопараллельное движение частиц постоянной и переменной массы [1, 2]. Однако в энергетических, сушильных и обогащительных агрегатах, проточных химических реакторах и т. д. широко распространены объемные течения, которые могут быть представлены как плоскопараллельные только в первом приближении.

В публикуемой статье описывается расчетная модель движения частиц в трехмерном пространстве.

В общем случае движение частиц в потоке газов может быть описано уравнением Мещерского (все обозначения см. в Приложении):

$$m \, d\vec{V}/dt = \sum_i^k \vec{P}_i + (\vec{W}_p - \vec{V})dm/dt. \quad (1)$$

Будем считать, что масса частиц изменяется медленнее, чем остальные параметры системы, и поэтому приближенно

$$m d\bar{V}/dt = \sum_i^k \bar{P}_i. \quad (2)$$

Основными силами, действующими на частицу при её движении в потоке газов, по данным [3—5], являются:

- 1) поверхностные силы ( $\bar{P}_c$  — сила лобового сопротивления,  $\bar{P}_A$  — сила Архимеда;
- 2) вес частицы  $\bar{P} = m\bar{g}$ ;
- 3) силы, связанные с градиентами газового потока ( $\bar{P}_{м-ж}$  — сила Магнуса-Жуковского, градиент скоростей;  $\bar{P}_T$  — сила термофореза, градиент температур);
- 4) силы, связанные с ускорением частицы ( $\bar{P}_p$  — сила присоединенной или отброшенной массы,  $\bar{P}_B$  — сила Бассе, нестационарное обтекание частицы);
- 5) силы, возникающие вследствие турбулентных пульсаций газового потока (действие этих сил моделируется введением коэффициентов искажения поля скоростей специальным блоком программы).

Указанные силы могут быть описаны следующими уравнениями:

$$\bar{P}_c = 1/2 C f_{Q_n} (\bar{W} - \bar{V}) |\bar{W} - \bar{V}|; \quad (3)$$

$$\bar{P} = m\bar{g}; \quad (4)$$

$$\bar{P}_A = -Q_n v \bar{g}; \quad (5)$$

$$\bar{P}_{м-ж} = 1/16 \pi^2 \delta^3 Q_n [(\bar{V} - \bar{W}) d\bar{W}/dn]; \quad (6)$$

$$\bar{P}_p = -1/2 v Q_n dv/dt; \quad (7)$$

$$\bar{P}_T = \bar{g} \pi v^2 Q_n \delta \lambda_n / [2(2\lambda_n + \lambda_v)] (T_\phi - T_v) / \delta \phi; \quad (8)$$

$$\bar{P}_B = -2/3 \delta^2 Q_n (\pi v)^{1/2} \int_0^r (d\bar{V}/dt) [dt / (\tau_r - t)^{1/2}]. \quad (9)$$

Перед разработкой алгоритма расчета движения частиц были оценены отношения сил  $\bar{P}_A$ ,  $\bar{P}_{м-ж}$ ,  $\bar{P}_p$ ,  $\bar{P}_T$ ,  $\bar{P}_B$  к основным действующим на частицу силам —  $\bar{P}_c$  и  $\bar{P}$  (табл. 1). При этом были приняты следующие упрощения:

- частица считается шаром;
- скорость витания частицы есть минимально-возможная скорость относительного движения;

$$-(T_\phi - T_v) / \delta \phi \sim \text{grad } T_n = dT_n/dX \bar{i} + dT_n/dY \bar{j} + dT_n/dZ \bar{k}. \quad (10)$$

С учетом полученных оценок и особенностей низкотемпературного вихревого (НТВ) топочного процесса (наличие областей с высокими градиентами температур и скоростей газового потока) было решено оценить воздействие величины сил  $\bar{P}_c$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{P}_{м-ж}$ ,  $\bar{P}_T$  количественно. С учетом указанных сил уравнение (2) в проекциях на оси координат  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} m dV_x/dt &= C_{Q_{\pi}} f/2(W_x - V_x)A + B[(V_y - W_y) dW_z/dZ - \\ &- (V_z - W_z) dW_y/dY] - C dT_{\pi}/dX; \\ m dV_y/dt &= C_{Q_{\pi}} f/2(W_y - V_y)A + \\ &+ B[(V_z - W_z) dW_x/dX - (V_x - W_x) dW_z/dZ] - C dT_{\pi}/dY; \\ m dV_z/dt &= C_{Q_{\pi}} f/2(W_z - V_z)A + \\ &+ B[(V_x - W_x) dW_y/dY - (V_y - W_y) dW_x/dX] - C dT_{\pi}/Z - m\bar{g}; \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где  $A = [(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2]^{1/2}$ ;

$$B = 1/16 \pi^2 Q_{\pi} \delta^3;$$

$$C = g \pi v^2 Q_{\pi} \delta \lambda_{\pi} / [2(2\lambda_{\pi} + \lambda_{\text{ч}}) T_{\pi}].$$

Теплообмен частицы с потоком газов удовлетворительно описывается уравнением, учитывающим теплообмен конвекцией и излучением:

$$dT_{\text{ч}}/dt = 6Nu\lambda_{\pi}/C_{\text{ч}}\delta^2 Q_{\pi} (T_{\pi} - T_{\text{ч}}) + 6\epsilon\sigma_0/(C_{\text{ч}}\delta Q_{\text{ч}})[(T_{\pi}/100)^4 - (T_{\text{ч}}/100)^4]; \quad (12)$$

Исходными данными для расчета системы уравнений (11)—(12) являются:

— начальные условия:  $t = 0$ ;  $m = m_0$ ;  $V_x = V_{x0}$ ;  $V_y = V_{y0}$ ;  $V_z = V_{z0}$ ;  $X = X_0$ ;  $Y = Y_0$ ;  $Z = Z_0$ ;  $T_{\text{ч}0}$ ;

— граничные условия: ограничивающие топочные поверхности задаются уравнениями плоскостей типа  $AX + BY + CZ = D$ ;

— поля скоростей газового потока задаются значениями проекций вектора скорости на оси  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  в узлах сетки, на которую разбит объем устройства; разбиение объема произведено плоскостями, параллельными плоскостям  $XOY$ ,  $XOZ$ ,  $YOZ$  с шагом по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  соответственно  $1 \times 1 \times 2$  м;

— поле температур газов задано значениями  $T$  в узлах сетки.

Численное решение системы уравнений (11)—(12) реализовано в виде программы, написанной на языке Фортран-4 (версия для ЭВМ СМ-1420). Блок-схема программы представлена на рис. 1.

Программа состоит из 15 блоков:

- 1 — блок описания формальных параметров;
- 2 — блок сравнения координат частицы и топочных поверхностей нагрева; если произошло касание или частица вышла за пределы топки, то печатается соответствующее сообщение;
- 3 — блок, позволяющий избежать закливания расчетов при многократных «ударах» о поверхность нагрева;
- 4 — блок определения по координатам частицы координат пространственной ячейки, в которой находится частица;
- 5 — блок определения методом линейной интерполяции по проекциям скоростей потока и его температуре соответствующих значений характеристик потока в месте нахождения частицы;
- 6 — логический блок, направляющий расчет при касании поверхности в блоки 13 и 14, в противном случае в блок 7;
- 7 — блок расчета относительной скорости частицы, кинематической вязкости потока, плотности и теплопроводности потока, критерия и коэффициента лобового сопротивления частицы (формулы описаны в [1, 2]);
- 8 — блок расчета градиентов скорости и температуры потока в дан-

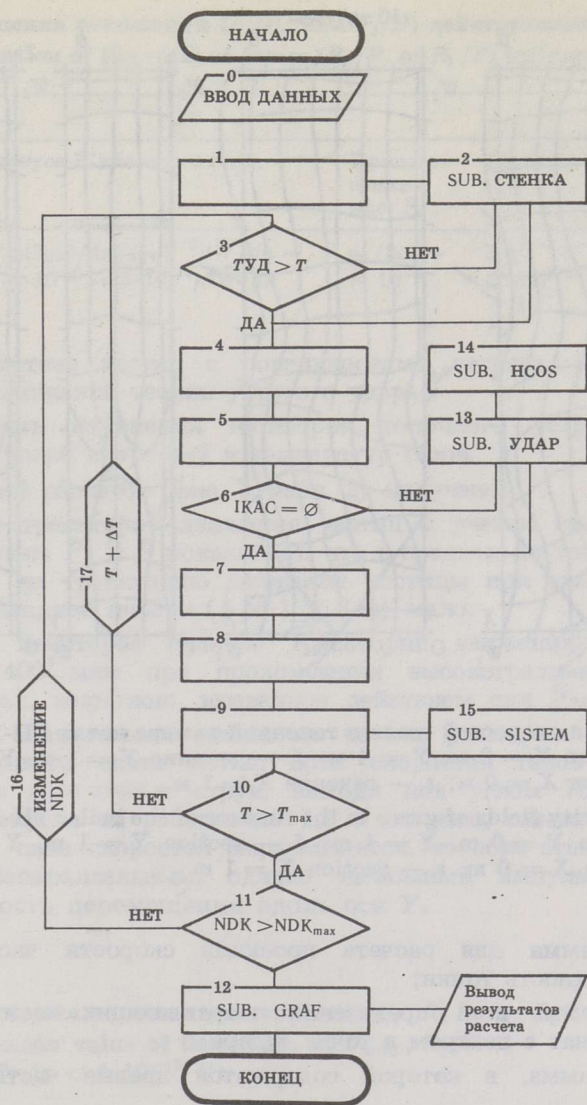


Рис. 1. Блок-схема программы расчета движения частиц в трехмерном объеме

Fig. 1. Flow chart of the program of calculating the particles motion in a three-dimensional space

ной пространственной ячейке как удельных средних изменений соответствующих параметров;

9 — блок численного решения уравнений (11) — (12) методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности, шаг интегрирования переменный, зависящий от векторной разницы скоростей потока и частицы ( $\vec{W} - \vec{V}$ );

10 — блок прекращения расчетов в случае, если температура частицы будет выше температуры плавления;

11 — блок перехода к следующему анализируемому размеру частиц;

12 — подпрограмма графопостроения траекторий частиц в объеме точки, которая вызывается после окончания всех расчетов;

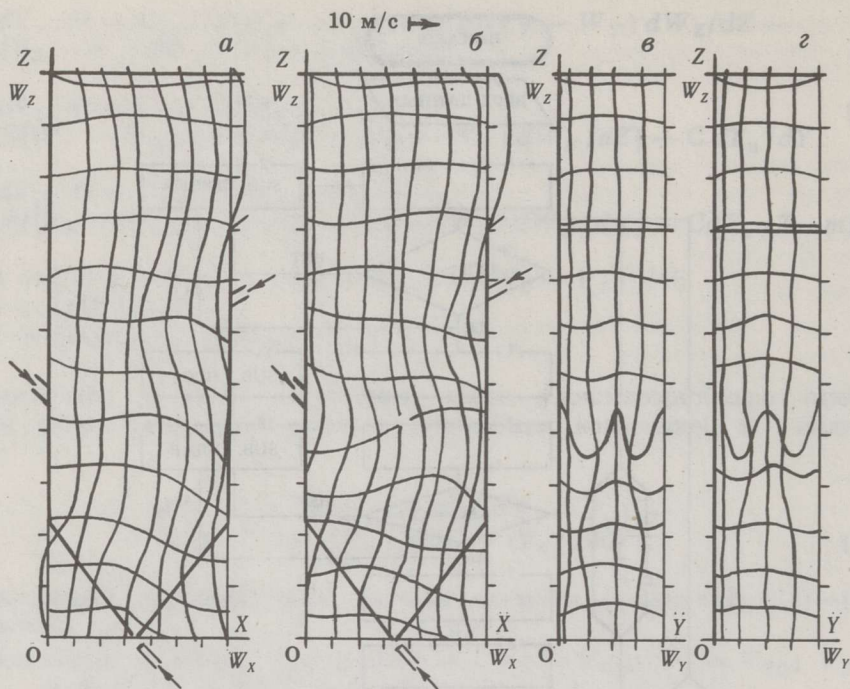


Рис. 2. Поля скоростей газов в топочной камере котла ТП-17-НТВ: а — сечение  $Y = 0$  м,  $Y = 4$  м; б — сечение  $Y = 1$  м,  $Y = 3$  м; в — сечение  $X = 0$  м; г — сечение  $X = 1$  м

Fig. 2. Velocity fields of gases in the furnace of the boiler TH-17-LTV: а — section  $Y = 0$  м,  $Y = 4$  м; б — section  $Y = 1$  м,  $Y = 3$  м; в — section  $X = 0$  м, г — section  $X = 1$  м

- 13 — подпрограмма для расчета проекций скорости частицы после «удара» о поверхность топки;
- 14 — подпрограмма для определения направляющих косинусов новой системы координат с центром в точке «удара»;
- 15 — подпрограмма, в которой содержатся правые части уравнений (11) — (12).

Исходные данные для расчета трехмерного движения частиц  $\text{CaO}$  и  $\text{CaCO}_3$  размером 100, 200, 500 и 1000 мкм были заданы в соответствии с геометрией, аэродинамикой и температурными полями котла ТП-17-НТВ Прибалтийской ГРЭС (нагрузка 180 т/ч, или 50 кг/с). Пример задания поля скоростей газов в различных сечениях топки представлен на рис. 2. При решении рассматривалась только левая половина объема топки.

При расчете траекторий движения частиц по описанной программе учтены:

- сила лобового сопротивления с учетом влияния относительной скорости движения частицы на величину коэффициента лобового сопротивления;
- сила веса частицы;
- сила Магнуса-Жуковского;
- сила термофореза;
- изменение теплофизических свойств потока газов ( $Q_{\text{п}}, v$ ) в зависимости от температуры;

Таблица 1. Оценка отношения ( $P_i/P_c$  или  $P_i/P$ ) действующих на частицу сил  
 Table 1. Evaluation of the ratio of forces ( $P_i/P_c$  or  $P_i/P$ ) influencing the particles

Сила				
Архимеда $P_A$	Магнуса-Жуковского $P_{М-ж}$	Присоединенных масс $P_p$	Бассе $P_B$	Термофореза $P_T$
$Q_{п}/Q_{ч} \sim 10^{-3}$	$(\pi/2)(3Q_{п}\delta/4gC_{ч}Q_{ч})^{1/2}d\bar{W}/dn \sim (4 \cdot 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-4})d\bar{W}/dn$	$Q_{п}/2Q_{ч} \sim 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5} \delta^{-1} \times (t_r)^{1/2} \sim 10^{-2}$	$\sim \text{grad } T_{п} \sim 10^{-4}$

— взаимодействие частиц с поверхностями нагрева, рассчитанное на основании положений теории упругого удара;

— возможность изменения геометрии топочного устройства, расчетной сетки и полей скоростей и температур газов.

В результате расчетов (рис. 3; табл. 2) получено:

1. Сравнение траекторий движения частиц с учетом сил  $\bar{P}_c$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{P}_{М-ж}$  и  $\bar{P}_T$  или только  $\bar{P}_c$  и  $\bar{P}$  показывает, что в среднем по топке влияние сил  $\bar{P}_{М-ж}$  и  $\bar{P}_T$  на траекторию движения частицы при значительных размерах элементарной ячейки ( $1 \times 1 \times 2$  м) мало.
2. Показано некоторое отличие траекторий движения частиц размером более 400 мкм при прохождении высокоградиентных областей нижнего дутья, возможно, вызванное действием сил  $\bar{P}_{М-ж}$  и  $\bar{P}_T$ .
3. Показано значительное смещение частиц размером более 400 мкм вдоль фронтального ската котла; поле скоростей газов задано таким образом, что горелочные струи, выходя под углом  $75^\circ$  к плоскости фронтального экрана на расстоянии 1,5 м от него, смыкаются и на расстоянии 3 м поле скоростей выравнивается, то есть становится практически параллельным; однако начальный импульс частиц дает им возможность перемещения вдоль оси  $Y$ .

Таблица 2. Средняя по топке величина сил  $P_c$ ,  $P$ ,  $P_{М-ж}$ ,  $P_T^*$ , Н  
 Table 2. The mean value of forces  $P_c$ ,  $P$ ,  $P_{М-ж}$ ,  $P_T$ , Н  
 (in all cases  $P_T$  is  $< 1 \cdot 10^{-19}$  Н)

Размер частиц, мкм	$P_c$	$P$	$P_{М-ж}$
100	$3,15 \times 10^{-8}$	$1,03 \times 10^{-8}$	$4,64 \times 10^{-13}$
200	$3,66 \times 10^{-7}$	$8,21 \times 10^{-7}$	$2,03 \times 10^{-11}$
500	$1,77 \times 10^{-6}$	$1,28 \times 10^{-6}$	$7,91 \times 10^{-10}$
1000	$8,64 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-5}$	$8,24 \times 10^{-9}$

\*  $P_T$  во всех случаях менее  $1 \cdot 10^{-19}$  Н.

4. При скоростях нижнего дутья 20 м/с частицы размером более 500 мкм зависают на фронтальном скате топки.

5. Частицы размером более 100, но менее 300 мкм проходят между горелками, но под действием веса возвращаются в горелочную струю, частицы размером 300 мкм оказываются циркулирующими в пределах нижней половины топки.

6. Расчетные данные о траекториях движения частиц в топке котла ТП-17-НТВ имеют хорошее качественное совпадение с картиной дви-

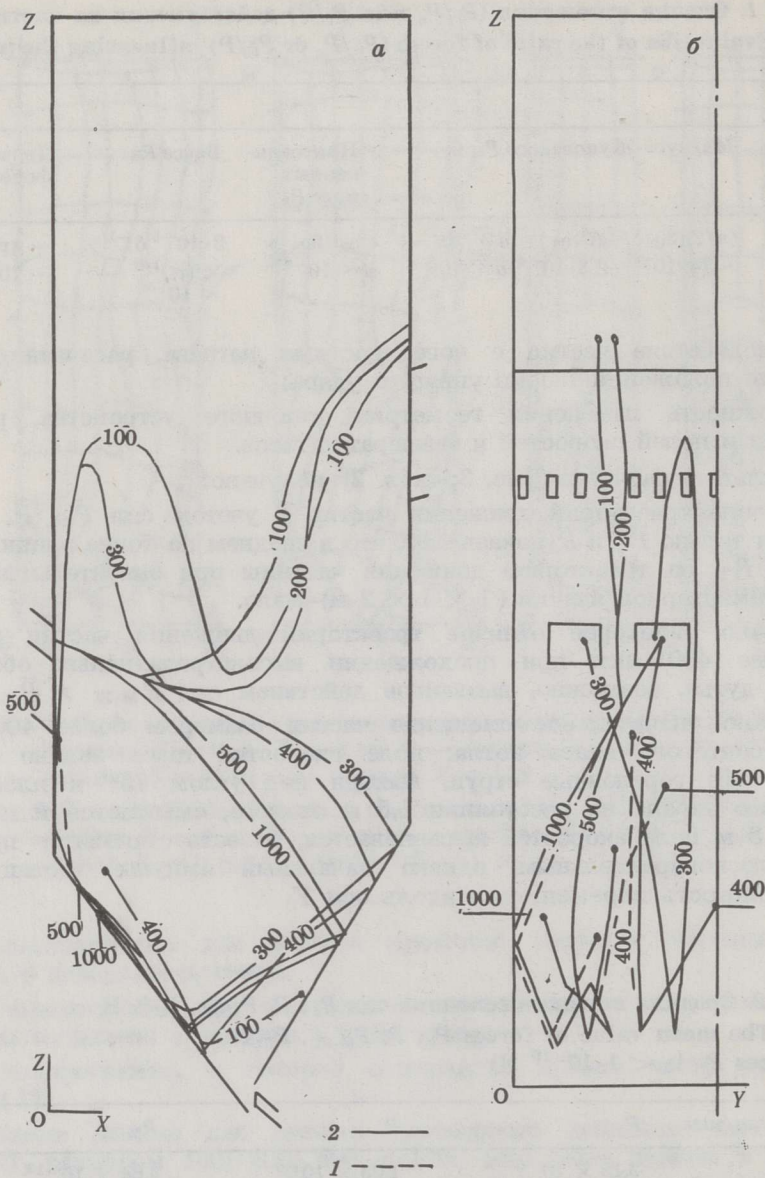


Рис. 3. Траектории движения частиц  $\text{CaO}$  и  $\text{CaCO}_3$  в топке котла ТП-17-НТВ: а — продольный, б — поперечный разрез топки; 1 — при учете сил  $P_c, P, P_{M-ж}, P_T$ ; 2 — при учете сил  $P_c$  и  $P$ .

Fig. 3. Trajectories of the motion of  $\text{CaO}$  and  $\text{CaCO}_3$  particles in the furnace of the boiler TH-17-LTV: а — longitudinal, б — cross-section of the furnace; 1 — taking into consideration forces  $P_c, P, P_{M-ж}, P_T$ ; 2 — taking into consideration forces  $P_c$  and  $P$ .

жения и скопления частиц золы и областей износа металла труб реального котла ТП-17 (ст. № 13) Прибалтийской ГРЭС. Это подтверждает применимость и реальную осуществимость модели для расчета движения частиц в случае объемных течений.

## Приложение: условные обозначения

$m$  — масса частицы;  $\vec{V}_ч$  — вектор скорости частицы;  $\vec{W}_p$  — вектор скорости отбрасываемых и присоединенных масс;  $\vec{W}_п$  — вектор скорости потока;  $\vec{P}_i$  — вектор  $i$ -й действующей на частицу силы;  $\delta$ ,  $\nu$  — диаметр и объем частицы;  $f$  — миделево сечение частицы;  $C$  — коэффициент лобового сопротивления;  $\rho_ч$ ,  $\rho_п$  — плотность частицы и потока;  $\delta_ф$  — толщина пограничного слоя около частицы;  $T_ф$ ,  $T_п$ ,  $T_ч$  — температура факела, потока и частицы соответственно;  $\bar{g}$  — ускорение свободного падения;  $\lambda_ч$ ,  $\lambda_п$  — теплопроводность частицы и потока;  $\nu$  — кинематическая вязкость потока;  $\tau_r$  — время релаксации частиц при турбулентных пульсациях топочных газов;  $C_ч$  — теплоемкость частицы;  $\varepsilon$  — приведенная степень черноты системы частица—поток, [1];  $\sigma_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\vec{P}_с$ ,  $\vec{P}$ ,  $\vec{P}_A$ ,  $\vec{P}_{М-ж}$ ,  $\vec{P}_p$ ,  $\vec{P}_T$ ,  $\vec{P}_B$  — силы лобового сопротивления, массовая, Архимеда, Магнуса-Жуковского, присоединенных масс, термофореза и Бассе соответственно;  $n$  — главная нормаль к траектории;  $Nu = 2 + 0,03Re^{0,34}Pr^{0,33} + 0,35Re^{0,8}Pr^{0,36}$  — число Нуссельта;  $Re + |\vec{V}| \delta / \nu$  — критерий Рейнольдса;  $Pr$  — критерий Прандтля;  $NDC$  — количество анализируемых частиц;  $IKAC$  — номер поверхности, о которую произошел «удар»;  $СТЕНКА$ ,  $HCOS$ ,  $УДАР$ ,  $SISTEM$ ,  $GRAF$  — названия подпрограмм;  $T_{max}$  — температура плавления частицы;  $TUD$  — задержка времени счета после «удара»;  $V_X$ ,  $V_Y$ ,  $V_Z$ ,  $W_X$ ,  $W_Y$ ,  $W_Z$  — проекции векторов скорости частицы и потока на оси координат;  $SUB \equiv SUBROUTINE$ .

Подстрочные индексы: 0 — начальные условия, ч — частица, п — поток, ф — факел;  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — проекции на оси  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ .

## SUMMARY

Mathematical modelling of the motion, chemical reactions and heat exchange of fuel and ash particles with gas-flows by developing furnaces and other equipment is important from a viewpoint of obtaining a great number of design solutions of the equipment. In addition, mathematical modelling of the above processes is also of importance when oil shales as a fuel with complex mineral matter are used for power purposes. At the present time it is necessary to develop such oil shale technologies which are harmless to the environment. Mathematical modelling offers possibilities in this respect.

Up to now, the calculation schemes applied to modelling described the motion of fuel and ash particles in plane-parallel currents. However, the gas-flows present in power equipment only at first may be represented as being plane. In the present work, a set of equations has been proposed describing a three-dimensional motion of particles of constant or variable mass in predetermined (from experiment or calculation of the aerodynamics of the non-laden flow) fields of rate and temperature of gas-flows on applied to the *ТП-17* boiler (low-temperature vortical) of the Baltic Thermal Power Station (Fig. 1).

The motion of particles was described by the Meshcherski equation (eg. (1)). After evaluation of the main forces influencing the particles the equation includes the following parameters: 1) drag force; 2) particle weight; 3) Magnus-Zhukovskii force; 4) thermophoresis force (Table 1).

The furnace chamber was divided into rectangular cells by planes parallel with coordinate planes  $XOY$ ,  $XOZ$ ,  $YOZ$  (Fig. 2). The coordinate axes are fixed and connected with the lower left corner of the furnace. In the intersection nodes of the above planes values of projections of the rate and temperature vectors of gases were given. Calculations of the motion of  $CaO$  particles of constant mass (size 100, 200, 500 and 1,000  $\mu m$ ) were performed (Fig. 3):

1. By plane and volume representation of the furnace chamber.
2. By taking into account the first two and all four forces influencing the particle. In both cases the corresponding changes were made in the set of equations. As a result of this work, qualitative agreement between calculation results and data on operation of the *ТП-17-НТВ* boiler was obtained. The possibility of modelling the motion of particles in volume currents is shown.
3. A shift of trajectories of the motion of particles along the axis of the vortex is demonstrated.



4. The absolute values of the forces influencing the particle (newtons) and the values of weight and drag forces were calculated (Table 2). The latter were higher than those of thermophoresis and Magnus-Zhukovskii by a factor of  $10^3$  and  $10^2-10^4$ , respectively. As the Magnus-Zhukovskii force depends on the gradient of the rate field and the curvature of the trajectory, this result is not final because higher dimensions of the volume grids into which the boiler furnace was divided ( $1 \times 1 \times 2$  m) were used. This smoothes the effect of gradients of the flow rates of burner jets and that of the lower draught.

Also other forces influencing the thermophoresis forces need further study.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Усик Б. В., Захаров В. Ю., Померанцев В. В. Метод расчета поведения частиц минеральной части топлива в топочной камере // Влияние минеральной части энергетического топлива на условия работы парогенераторов : Тез. докл. 3-й Всесоюз. конф. Таллинн, 1980. С. 138—145.
2. Альфимов Г. В., Захаров В. Ю., Рундыгин Ю. А., Коган Е. Л. Математическое моделирование превращения минеральной части топлива в топке котла // Влияние минеральной части топлива на условия работы парогенераторов : Тез. докл. 4-й Всесоюз. конф. Таллинн, 1986. С. 48—54.
3. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. — М., 1975.
4. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. — М., 1955.
5. Леонтьев А. И., Цалко Э. А. Перенос частиц аэрозолей в неизотермическом потоке // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7, № 4. С. 715—722.

Ленинградский государственный  
технический университет

Представил И. П. Эпик  
Поступила в редакцию  
20.12.89

Leningrad State Technical  
University

Presented by I. Öpik  
Received 20.12.89